

УДК 621.311

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; В. В. Кулик, к. т. н.; О. Б. Бурикін, асп.

ФУНКЦІОНАЛЬНА ЗАЛЕЖНІСТЬ СКЛАДОВИХ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ У ВІТКАХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ВІД ПОТУЖНОСТІ У ВУЗЛАХ

Розглянуто актуальну проблему визначення втрат потужності та електроенергії від транзитних перетоків. Розроблено метод розрахунку окремих складових втрат потужності у вітках схеми електричної мережі, які викликаються потужностями у вузлах. Метод ґрунтується на використанні алгоритмів і програм розрахунку ustalених режимів електричних мереж і призначений для визначення втрат від транзитних перетоків потужності.

Вступ

Через організаційні зміни в структурі електроенергетики та введення ринкових стосунків між суб'єктами, що займаються виробництвом, передачею та розподілом електроенергії, стало актуальним визначення втрат потужності та електроенергії від взаємних перетоків. Особливо якщо електричні мережі є взаємопов'язаними та об'єднаними в електричну систему. Така постановка задачі передбачає фінансові (комерційні) взаєморозрахунки між власниками електричних мереж за транзити електроенергії та взаємні перетоки потужності лініями електропередачі. Отже необхідно мати методичку визначення втрат потужності від взаємних перетоків.

Складність цієї задачі полягає в тому, що втрати потужності залежать від потужностей у вузлах і вітках схеми мережі нелінійно і скористатися методом накладання неможливо. На даний момент в інженерній практиці використовується ряд методів, що дозволяють виконувати розрахунок втрат, як з однозначно заданою інформацією, так і з імовірнісно-статистичним оцінюванням втрат (регресійний аналіз) [1–4]. Використання даних методів в розподільних радіальних мережах, як правило, призводить до виникнення похибки, допустимої на етапі планування втрат електроенергії. Однак, у замкнених та складно-замкнених електричних мережах збільшується вплив режимних факторів, інформація про які практично відсутня на етапі планування. Це може викликати суттєві помилки обліку додаткових технічних втрат електроенергії у разі відхилення режиму електричної мережі від планового.

Дану статтю присвячено розробленню методу розрахунку окремих складових втрат потужності у вітках схеми електричної мережі, які викликаються потужностями у вузлах. Метод ґрунтується на використанні алгоритмів і програм розрахунку ustalених режимів електричних мереж та стандартного інформаційного забезпечення.

Втрати потужності у вітках схеми

Значення повної потужності на початку і в кінці кожної вітки схеми визначається за формулою [5]

$$\dot{S}_B = \sqrt{3}\dot{U}_d \mathbf{M}_\Sigma \hat{\mathbf{I}}_d, \quad (1)$$

де \dot{U}_d — діагональна матриця напруг у вузлах включаючи і базисний; \mathbf{M}_Σ — матриця з'єднань віток у вузлах включаючи і балансувальний; $\hat{\mathbf{I}}_d$ — діагональна матриця струмів у вітках схеми (тут і далі знак $\hat{}$ означає, що матриця або вектор є спряжений).

Якщо вираз (1) помножити зліва на одиничний транспонований вектор n_t , то в результаті отримаємо транспонований вектор втрат потужності у вітках схеми:

$$\Delta \dot{S}_{Bt} = \sqrt{3}n_t \dot{U}_d \mathbf{M}_\Sigma \hat{\mathbf{I}}_d$$

або з урахуванням того, що $n_t \dot{U}_d = \dot{U}_t$,

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_{Bt} = \sqrt{3} \dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma} \hat{\mathbf{I}}_d, \quad (2)$$

де $\dot{\mathbf{U}}_t$ — транспонований вектор напруг у вузлах включаючи і базисний.

З (2) видно, що втрати в i -й вітці схеми визначаються

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_{Bi} = \sqrt{3} (\dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{I}}_i, \quad (3)$$

де $\mathbf{M}_{\Sigma i}$ — вектор-стовпець матриці інциденцій; $\hat{\mathbf{I}}_i$ — струм в i -й вітці, який може бути визначений через струми у вузлах

$$\hat{\mathbf{I}}_i = \hat{\mathbf{C}}_i \hat{\mathbf{J}},$$

де $\hat{\mathbf{C}}_i$ — i -й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах $\hat{\mathbf{J}}$ по вітках схеми.

Підставивши останній вираз у (3), отримуємо:

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_{Bi} = \sqrt{3} (\dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \hat{\mathbf{J}}. \quad (4)$$

З урахуванням того, що

$$\hat{\mathbf{J}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{\mathbf{U}}_d^{-1} \dot{\mathbf{S}},$$

(4) можна переписати

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_{Bi} = (\dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \dot{\mathbf{U}}_d^{-1} \dot{\mathbf{S}}. \quad (5)$$

Позначимо в (5)

$$\dot{\mathbf{T}}_i = (\dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \dot{\mathbf{U}}_d^{-1}. \quad (6)$$

Вектор-рядок $\dot{\mathbf{T}}_i$ складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку в сумарних втратах в i -й вітці складає протікання потужності по ній до кожного вузла.

На підставі (5) і (6) можна записати

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_B = \dot{\mathbf{T}} \dot{\mathbf{S}}, \quad (7)$$

де $\Delta \dot{\mathbf{S}}_B$ — вектор сумарних втрат у вітках схеми; $\dot{\mathbf{T}}$ — матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми в залежності від потужності у вузлах схеми, кожний рядок якої складається з (6).

Зауважимо, що коефіцієнти розподілу втрат залежать від параметрів схеми, які за певних допущень можна вважати постійними, а також від значень напруги у вузлах, які визначаються навантаженням і генеруванням у вузлах схеми. Таким чином нелінійність залежності втрат від параметрів режиму зберігається. Визначення коефіцієнтів матриці $\dot{\mathbf{T}}$ через точні значення вузлових напруг по суті означає лінеаризацію режиму електричної мережі при зафіксованих потужностях у вузлах.

Алгоритм визначення втрат потужності в заданій вітці (вітках) від потужностей у вузлах

Структурно-логічна схема визначення втрат потужності в заданих вітках мережі від протікання ними потужностей заданих вузлів показана на рис. 1. У відповідності з (5) та (6) для визначення втрат потуж-

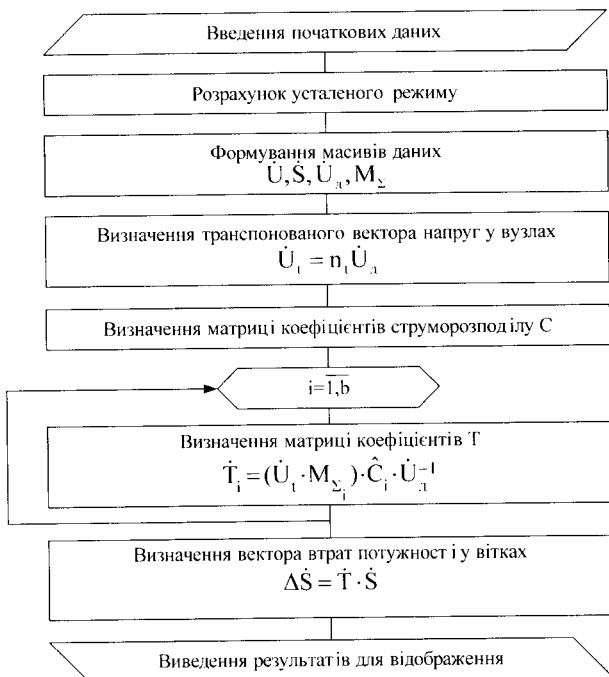


Рис. 1. Алгоритм визначення втрат потужності в заданих вітках електричної мережі

ності у вітках формується розрахункова модель всієї електричної мережі, для якої розраховується ustalений режим. За результатами розрахунків формуються масиви напруг \dot{U} і \dot{U}_d у вузлах і уточнюються потужності у вузлах з урахуванням зарядної потужності ЛЕП та втрат на корону.

Матриця струморозподілу розраховується або за відомою формулою

$$C = z_e^{-1} M_t (M z_e^{-1} M_t)^{-1},$$

або методом одиничних струмів. Далі у відповідності з (6) формується матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності \dot{T} . За допомогою останньої для введеного списку віток θ_B визначаються частки втрат потужності від навантаження вузлів, номери яких θ_y вказані у початкових даних.

Приклад

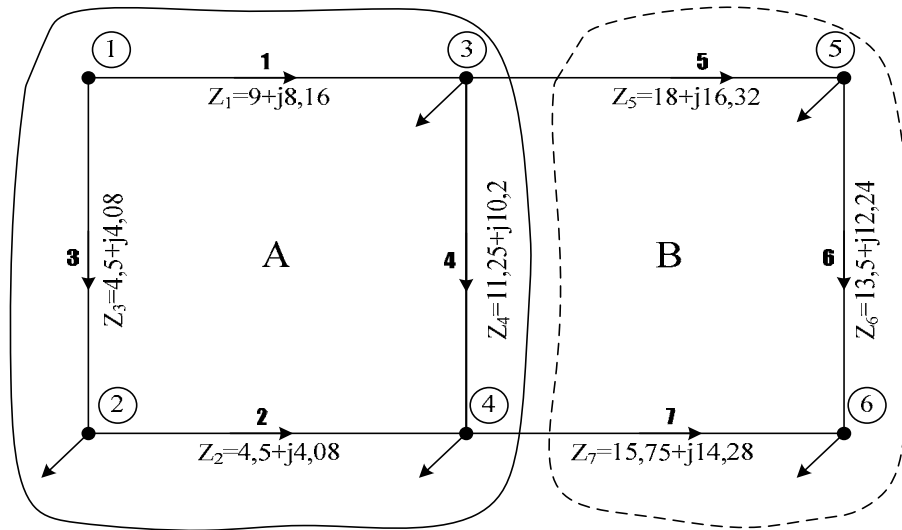


Рис. 2. Схема електричної мережі

Розглянемо можливості та ефективність застосування методу визначення окремих складових втрат у вітках електричної мережі від протікання потужності окремих вузлів на прикладі задачі визначення втрат потужності від транзитних перетоків. Схему електричної мережі, в якій необхідно перерозподілити втрати активної потужності та її параметри, показано на рис. 2. На схемі виділено два фрагменти мережі, для яких необхідно визначити, яке значення матимуть втрати в частині мережі А від транзиту в ній потужності, яка споживається в частині мережі В.

Результати розрахунку ustalеного режиму наведено в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

Інформація про вузли

№ вузла	P, МВт	Q, Мвар	U, кВ	Фаза, град
1	-93,99	-47,18	115	0
2	30	14,53	111,79	-0,46
3	15	7,26	110,72	-0,61
4	10	4,84	110,33	-0,67
5	20	9,68	106,34	-1,28
6	15	7,26	106,71	-1,22

Таблиця 2

Інформація про вітки

№ на схемі	№ поч.	№ кінця	P_{Π} , МВт	Q_{Π} , Мвар	$P_{К}$, МВт	$Q_{К}$, Мвар	ΔP , МВт	ΔQ , Мвар	I , кА
1	1	3	37,55	18,93	-36,35	-17,83	1,203	1,091	0,211
2	2	4	25,08	12,5	-24,8	-12,24	0,283	0,256	0,145
3	1	2	56,43	28,26	-55,08	-27,03	1,355	1,229	0,317
4	3	4	2,72	1,31	-2,71	-1,3	0,008	0,008	0,016
5	3	5	18,63	9,27	-17,99	-8,69	0,636	0,576	0,108
6	5	6	-2,01	-0,99	2,01	0,99	0,006	0,005	0,012
7	4	6	17,51	8,7	-17,01	-8,25	0,495	0,449	0,102

Сумарні втрати потужності в електричній мережі $\Delta \dot{S} = 3,99 + j3,61$ МВА.

Розрахована у відповідності до (6) матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності T має вигляд

$$T = \begin{bmatrix} 0,00636 + j0,00180 & 0,02577 + j0,00738 & 0,01287 + j0,00370 & 0,02162 + j0,00647 & 0,01773 + j0,00528 \\ -0,00217 - j0,00060 & 0,00438 + j0,00123 & 0,00883 + j0,00248 & 0,00629 + j0,00184 & 0,00758 + j0,00221 \\ 0,02392 + j0,00689 & 0,00961 + j0,00280 & 0,01938 + j0,00566 & 0,01381 + j0,00419 & 0,01664 + j0,00503 \\ 0,00047 + j0,00014 & -0,00095 - j0,00028 & 0,00095 + j0,00028 & -0,00023 - j0,00007 & 0,00033 + j0,00010 \\ 0,00125 + j0,00035 & -0,00253 - j0,00072 & 0,00254 + j0,00072 & 0,02483 + j0,00735 & 0,01454 + j0,00429 \\ -0,00011 - j0,00003 & 0,00021 + j0,00006 & -0,00021 - j0,00006 & 0,00138 + j0,00042 & -0,00123 - j0,00037 \\ -0,00104 - j0,00029 & 0,00209 + j0,00059 & -0,00210 - j0,00059 & 0,01346 + j0,00396 & 0,02186 + j0,00641 \end{bmatrix}$$

Вектор потужностей у вузлах

$$\dot{S}_t = [30 + j14,53 \quad 15 + j7,26 \quad 10 + j4,84 \quad 20 + j9,68 \quad 15 + j7,26].$$

Втрати у вітках мережі у відповідності з (7) визначаються

$$\Delta \dot{S}_e = T \dot{S} = \begin{matrix} & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{matrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} 0,164 + j0,146 + 0,333 + j0,298 + 0,111 + j0,099 + \mathbf{0,370} + \mathbf{j0,339} + \mathbf{0,228} + \mathbf{j0,208} \\ -0,056 + j0,050 + 0,057 + j0,050 + 0,076 + j0,068 + \mathbf{0,108} + \mathbf{j0,098} + \mathbf{0,098} + \mathbf{j0,088} \\ 0,617 + j0,554 + 0,124 + j0,112 + 0,166 + j0,150 + \mathbf{0,236} + \mathbf{j0,218} + \mathbf{0,213} + \mathbf{j0,196} \\ 0,012 + j0,011 - 0,012 - j0,011 + 0,008 + j0,007 - \mathbf{0,004} - \mathbf{j0,004} + \mathbf{0,004} + \mathbf{j0,004} \\ 0,033 + j0,029 - 0,033 - j0,029 + 0,022 + j0,020 + 0,425 + j0,387 + 0,187 + j0,170 \\ -0,003 - j0,002 + 0,003 + j0,002 - 0,002 - j0,002 + 0,024 + j0,022 - 0,016 - j0,014 \\ -0,027 - j0,024 + 0,027 + j0,024 - 0,018 - j0,016 + 0,231 + j0,210 + 0,281 + j0,255 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,206 + j1,090 \\ 0,282 + j0,254 \\ 1,356 + j1,230 \\ 0,008 + j0,007 \\ 0,634 + j0,576 \\ 0,006 + j0,006 \\ 0,494 + j0,449 \end{bmatrix} \text{ МВА.}$$

Сумарні втрати потужності в електричній мережі дорівнюють

$$\Delta \dot{S} = \mathbf{n}_t \Delta \dot{S}_e = 3,99 + j3,61 \text{ МВА.}$$

Визначимо втрати потужності в частині мережі А (вітки 1, 2, 3 і 4) від протікання в ній навантаження частини мережі В (вузли 5 і 6). Для цього необхідно скласти записані в попередній таблиці втрати у вітках 1, 2, 3 і 4 від протікання навантаження вузлів 5 і 6 (у таблиці виділено жирним шрифтом)

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S}_{AB} &= 0,37 + 0,228 + 0,108 + 0,098 + 0,236 + 0,213 - 0,004 + 0,004 + \\ &+ j(0,339 + 0,208 + 0,098 + 0,088 + 0,218 + 0,196 - 0,004 + 0,004) = \\ &= 1,206 + j1,090 \text{ МВА.} \end{aligned}$$

Таким чином, втрати активної потужності в мережі А від транспортування по ній потужності, яка споживається в мережі В, складає 1,206 МВт. Від’ємне значення втрат у вітці 4 від навантаження вузла 5 пояснюється тим, що частка потужності S_5 , яка протікає віткою 4, направлена назустріч сумарній потужності цієї вітки і, отже, зменшує резуль-

туюче значення потужності. Відповідно зменшуються і втрати.

Висновки

1. Представлення залежностей між параметрами режиму електричної мережі в лінеаризованому вигляді дозволяє встановити для конкретного стану мережі коефіцієнти розподілу сумарних втрат потужності від навантаження вузла по окремих вітках схеми.

2. За допомогою розрахованої матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності можна для заданої частини електричної мережі визначити втрати потужності від навантаження одного вузла або групи вузлів, які належать іншій частині мережі. На цій підставі може бути побудовано алгоритм визначення втрат потужності в електричній мережі від транзитних перетоків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. Расчёт, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. — М: ЭНАС, 2003. — 280 с.
2. Таласов А. Г. Потери на транзит электроэнергии и их распределение между участниками энергообмена // Электрические станции. — 2002. — № 1. — С. 20–25.
3. Стогний Б., Павловский В. Определение транзитных потерь мощности в фрагментированных электрических сетях областных энергоснабжающих компаний // Энергетическая политика Украины. — 2004. — № 5. — С. 26–31.
4. Потребич А. А., Катренко Г. Н. Расчёт потерь электроэнергии, возникающих вследствие её транзита между энергокомпаниями // Энергетика и электрификация. — 2004. — № 4. — С. 29–34.
5. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей. — М.: Энергия, 1972. — 232 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Надійшла до редакції 5.04.05
Рекомендована до друку 18.05.05

Лежнюк Петро Дем'янович — завідувач кафедри; **Кулик Володимир Володимирович** — доцент; **Бурикін Олександр Борисович** — аспірант.

Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет